

# 湘江株洲枢纽库尾整治河段船舶操纵运动模拟

舒小红<sup>1</sup>, 邹开明<sup>2</sup>, 汪映红<sup>3</sup>

1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008; 2. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;  
3. 湖南省湘水集团有限公司, 湖南 长沙 410011

**摘要:**为解决散乱浅滩弯曲河段水流条件复杂、船舶航行困难且易受浅水效应影响的问题,建立平面二维水流数学模型及船舶操纵运动数学模型,以湘江株洲枢纽库尾鱼弄子滩为例,通过实测资料验证数学模型的可靠性,对典型工况进行船舶运动数值模拟,计算相应航行参数,评估航道整治效果及通航条件。结果表明:疏浚受散乱浅滩影响的弯曲航道能有效优化航道水流流态,明显改善船舶通航条件。该数值模拟可为评估散乱浅滩弯曲航道的整治效果提供科学依据和指导。

**关键词:**船舶操纵运动数学模型;浅水效应;散乱浅滩;弯曲航道

**中图分类号:**U661.33

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2023)04-0153-10

**引用格式:**舒小红,邹开明,汪映红.湘江株洲枢纽库尾整治河段船舶操纵运动模拟[J].山东交通学院学报,2023,31(4):153-162.

SHU Xiaohong, ZOU Kaiming, WANG Yinghong. Ship maneuvering simulation for the river section in the tail of the Xiangjiang Zhuzhou Hub Reservoir[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(4): 153-162.

## 0 引言

在航道工程中,船舶操纵数值模拟能有效规避风险,提高船舶操纵的安全性,数值船模技术应用广泛<sup>[1-3]</sup>。目前有2种典型的水动力模型:1)将船、桨、舵视为一体的整体式水动力模型,将作用其上的流体动力展开为泰勒级数形式,增加了问题的复杂性,方程中的诸多参数需通过实船试验确定,成本较高,测试精度受试验仪器所限;2)是以船舶操纵运动数学模型研讨小组为代表的分离式水动力模型,即井上模型,不断发展已趋成熟<sup>[4]</sup>。与整体式模型相比,分离式模型的参数具有严格的物理意义,与实船试验数据结合效果更好,可用船、桨、舵依次表示船舶受到的力矩、纵向和横向的流体动力<sup>[5]</sup>,在考虑船舶自身操纵性能的基础上,能引进风效应、浅水效应、岸壁效应等外界因素,可较好地反映复杂条件下的船舶航行状态。

评估散乱浅滩、弯曲航道的整治效果,大多依赖规范数值计算及水流数学模型分析通航条件。近年来,随浅水效应研究的深入,内河航道的研究成果逐步引入浅水船舶操纵运动数学模型。Sano等<sup>[6]</sup>分析船舶在航道边壁行驶时,浅水效应和岸壁效应对水动力特性的影响,估计平衡状态下所需舵角和船体漂移角,提出安全运行的极限离中心线位移;Naz等<sup>[7]</sup>采用计算流体动力学技术研究高速双体船和三体船在有限水深下的水动力特性,发现与深水相比,有限深度水的总阻力显著增大,浅水情况下,2种船的下沉和纵倾显著增大;Yasukawa<sup>[8]</sup>对靠近河岸的汽车运输船进行模型试验,分析不同水深、不同靠岸距离下的船舶航行稳定性,提出可用于船舶靠岸处航向稳定性的常规评估方法;童思陈等<sup>[9]</sup>开发基于浅水效应

收稿日期:2022-05-27

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201830)

第一作者简介:舒小红(1982—),男,湖南怀化人,高级工程师,主要研究方向为航道管理及设计,E-mail:28009718@qq.com。

的三自由度船舶操纵运动数学模型,并应用在山区河道中,认为采用基于浅水效应的模型计算山区河道的船舶操纵运动更合理,更符合实际情况。已有研究中,较少涉及水流条件复杂的弯曲河段。

针对湘江株洲枢纽库尾鱼弄子滩碍航散乱浅滩弯曲航道,本文结合平面二维水流数学模型及船舶操纵运动数学模型进行数值模拟,综合分析通航水流条件,评估航道整治效果,以期改善船舶通航条件。

## 1 平面二维水流数学模型

山区航道蜿蜒曲折,水流的非均匀流动特性较强,边界起伏变化较大,与静水域或顺直水域下的一般水流数学模型不同,需建立非均匀水流数学模型,采用贴体正交网格的计算方法获得更符合实际的计算结果<sup>[10]</sup>。

水流连续性方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (huC_\eta) + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (hvC_\xi) = 0, \quad (1)$$

式中:  $H$  为水位;  $t$  为时间;  $\xi, \eta$  为正交曲线坐标系的 2 个方向;  $C_\xi, C_\eta$  为坐标系中的拉梅系数,其中,  $C_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}$ ,  $C_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$ ;  $u, v$  分别为沿  $x, y$  方向的流速;  $h$  为水深。

$\xi$  方向动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u^2) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi uv) + uv \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - v^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \xi} \right] = -g \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} - 3v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g/4 + \\ \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\eta}) + \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $\sigma_{\xi\eta}, \sigma_{\eta\xi}, \sigma_{\eta\eta}$  为紊动切应力,  $\sigma_{\eta\eta} = 2v_t \left( \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{u}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right)$ ,  $\sigma_{\xi\eta} = \sigma_{\eta\xi} = v_t \left[ \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{v}{C_\eta} \right) + \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{u}{C_\xi} \right) \right]$ ;  $v_t$  为紊动黏性系数,  $v_t = C_\mu K^2 / \varepsilon$ , 其中,  $k$  为紊动动能系数,  $\varepsilon$  为紊动耗散系数, 可通过运输方程求解<sup>[10]</sup>。

$\eta$  方向动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta uv) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v^2) + uv \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - u^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \xi} \right] = -g \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} - 3v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g/4 + \\ \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\eta}) + \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right], \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $\sigma_{\xi\xi}$  为紊动切应力,  $\sigma_{\xi\xi} = 2v_t \left( \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right)$ 。

式(2)(3)形式相似,可写为一般格式为:

$$C_\xi C_\eta \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial (C_\eta u \psi)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi v \psi)}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \Gamma \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \Gamma \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right) + C, \quad (4)$$

式中:  $\psi$  为舵向角,  $\Gamma$  为扩散系数,  $C$  为源项。

求解方程(1)~(3)时,编译式(4)的通用程序,即可求解全部控制方程。

## 2 浅水船舶操纵运动数学模型

船舶的操纵航行问题一般属于空间六自由度的复杂问题,从解决工程实际问题出发,主要关注船舶的横荡、纵荡、艏摇,采用 Fortran 语言建立三自由度的船舶运动数学模型。

### 2.1 静止深水、动水条件下的船舶运动方程

静止深水条件下的船舶运动方程为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} F_x = (m + m_{11}) \dot{v}_x - (m + m_{22}) v_y r \\ F_y = (m + m_{22}) \dot{v}_y + (m + m_{11}) v_x r \\ M = (I_z + J_z) \dot{r} \end{cases}$$

式中:  $F_x$  为船舶在空间坐标系  $x$  轴上的合外力,  $F_y$  为船舶在空间坐标系  $y$  轴上的合外力,  $m$  为附加质量,  $m_{11}$  为  $x$  方向上的附加质量,  $m_{22}$  为  $y$  方向上的附加质量,  $v_x$  为船舶在空间坐标系  $x$  轴上的对水速度,  $v_y$  为船舶在空间坐标系  $y$  轴上的对水速度,  $r$  为转艏角速度,  $M$  为绕船舶重心垂直轴的合力矩,  $I_z$  为船舶绕船体坐标系  $z$  轴的自身质量惯性矩,  $J_z$  为  $z$  方向的附加转动惯量。

B 为裸船体, P 为螺旋桨, R 为船舵, 船体受到的合力及合力矩方程为:

$$\begin{cases} F_x = F_{xB} + F_{xP} + F_{xR} \\ F_y = F_{yB} + F_{yP} + F_{yR} \\ M = M_B + M_P + M_R \end{cases}$$

式中:  $F_{xB}$ 、 $F_{yB}$  为裸船体在  $x$  轴、 $y$  轴上的合外力,  $F_{xP}$ 、 $F_{yP}$  为螺旋桨在  $x$  轴、 $y$  轴上的合外力,  $F_{xR}$ 、 $F_{yR}$  为船舵在  $x$  轴、 $y$  轴上的合外力,  $M_B$  为裸船体绕船舶重心垂向上的合力矩,  $M_P$  为螺旋桨绕船舶重心垂向上的合力矩,  $M_R$  为船舵绕船舶重心垂向上的合力矩。

因浅水效应作用, 当以  $x_c$  为船舶中心点坐标时, 合力矩方程为  $M - F_B x_c = (I_z + J_z) \dot{r}$ 。

动水中, 引入水流作用力的深水船舶运动方程为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} (m + m_{11}) \dot{u}_x = F_x(v_x, v_y, r) + (m + m_{22}) v_y r + (m + m_{11}) v r \sin(\psi_F - \psi) \\ (m + m_{22}) \dot{u}_y = F_y(v_x, v_y, r) - (m + m_{11}) v_x r - (m + m_{22}) v r \cos(\psi_F - \psi) \\ (I_z + J_z) \dot{r} = M(v_x, v_y, r) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u_x$ 、 $u_y$  分别为附体坐标原点速度,  $v$  为水流的绝对速度,  $\psi_F$  为水流方向角。

## 2.2 浅水效应影响下的动水船舶运动方程

浅水效应影响下的动水船舶运动方程同式(5), 通过修正式(5)参数, 可反映浅水效应数学模型对船舶运动轨迹的影响。

### 1) 浅水效应影响下附加质量和附加转动惯量

浅水效应影响下附加质量和附加转动惯量的计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} m_{xq}/m_{xs} = [(h_q/d - 1)^{1.3} + 3.77 + 1.14B/d - 0.233L/d - 3.43C_b] / (h_q/d - 1)^{1.3} \\ m_{yq}/m_{ys} = [(h_q/d - 1)^{0.82} + 0.413 + 0.032B/d + 0.0129(B/d)^2] / (h_q/d - 1)^{0.82} \\ J_q/J_s = [(h_q/d - 1)^{0.82} + 0.413 + 0.0192B/d + 0.00554(B/d)^2] / (h_q/d - 1)^{0.82} \end{cases}$$

式中:  $m_{xq}$  为浅水中  $x$  方向上的附加质量,  $m_{yq}$  为浅水中  $y$  方向上的附加质量,  $J_q$  为浅水中的附加转动惯量,  $m_{xs}$  为深水中  $x$  方向上的附加质量,  $m_{ys}$  为深水中  $y$  方向上的附加质量,  $J_s$  为深水中的附加转动惯量,  $h_q$  为浅水水深,  $d$  为设计吃水,  $L$  为船舶长度,  $B$  为船舶宽度,  $C_b$  为方型系数。

### 2) 浅水效应影响下纵向水动力

受浅水效应影响, 将直航总阻力系数修正为<sup>[12]</sup>:

$$C_{dr} = C_{th}/C_{t\infty} = a + bd/h_q,$$

式中:  $C_{th}$  为浅水环境下的总阻力系数,  $C_{t\infty}$  为深水环境下的总阻力系数,  $a$ 、 $b$  为相关系数。

浅水效应作用下纵向流体总动力导数<sup>[12]</sup>

$$X_L = X_q/X_s = 1 - 0.9879d/h_q + 21.9123(d/h_q)^2 - 73.8161(d/h_q)^3 + 71.1409(d/h_q)^4,$$

式中:  $X_q$  为浅水环境下的纵向流体动力导数,  $X_s$  为深水环境下的纵向流体动力导数。

### 3) 浅水效应影响下的横向水动力及动力矩

展弦比  $\lambda = 2d/L$ , 有效展弦比

$$\lambda_e = 2\lambda h_q/d + ([\pi d/2h_q \cot(\pi d/2h_q)]^n),$$

式中  $n$  为常数。

线性流体动力导数<sup>[12]</sup>

$$n = \begin{cases} 2.3, Y'_{v_y h_q} = -\left(\frac{\pi}{2}\lambda_e + 1.4C_b \frac{B}{L}\right) \\ 0.7, Y'_{r h_q} = \frac{\pi}{4}\lambda_e \\ 1.7, N'_{v_y h_q} = -\lambda_e \\ 0.7, N'_{r h_q} = -(0.54\lambda_e - \lambda_e^2) \end{cases},$$

式中:  $Y'_{v_y h_q}$  为浅水环境下船舶横向运动速度方向的流体动力导数,  $Y'_{r h_q}$  为浅水环境下船舶转艏角速度方向的流体动力导数,  $N'_{v_y h_q}$  为浅水环境下船舶横向运动速度方向的流体动力距导数、 $N'_{r h_q}$  为浅水环境下船舶转艏角速度方向的横向流体动力距导数。

受浅水效应影响,非线性流体动力导数改为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} Y'_{v_y v_y h_q} / Y'_{v_y v_y \infty} = 1 + 14(d/h_q)^{3.5} \\ Y'_{r r h_q} / Y'_{r r \infty} = 1 + 3(d/h_q)^{2.5} \\ Y'_{v_y r h_q} / Y'_{v_y r \infty} = 1 + 3(d/h_q)^{2.5} \\ N'_{r r h_q} / N'_{r r \infty} = 1 + 5(d/h_q)^{3.5} \\ N'_{v_y v_y r h_q} / N'_{v_y v_y r \infty} = 1 + 6(d/h_q)^{2.5} \\ N'_{v_y r r h_q} / N'_{v_y r r \infty} = 1 + 6(d/h_q)^{2.5} \end{cases},$$

式中  $\infty$  为深水环境。

#### 4) 浅水效应作用下的螺旋桨推力和转矩

计算浅水域中的螺旋桨推力  $X_p$  时,条件与深水域相同,但推力减额系数  $t_p$  和伴流系数  $\omega_p$  与深水域不同<sup>[14]</sup>,计算公式分别为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} (1 - t_p)_q / (1 - t_p)_\infty &= 1 / [1 - 0.2d/h_q + 0.7295(d/h_q)^2], \\ (1 - \omega_p)_q / (1 - \omega_p)_\infty &= \cot(1.4C_b d/h_q), \end{aligned}$$

式中:  $(1 - t_p)_q$  和  $(1 - t_p)_\infty$  分别为浅水、深水条件下对应的推力减额系数函数关系式,  $(1 - \omega_p)_q$ 、 $(1 - \omega_p)_\infty$  分别为浅水、深水条件下对应的伴流系数函数关系式。

#### 5) 浅水效应下舵力和舵力矩

计算浅水域中的舵力减额系数  $t_R$  时,条件与深水域相同,计算力矩时将整流系数修正为<sup>[16]</sup>:

$$\gamma_{R h} / \gamma_{R \infty} = 1 + 0.0161d/h_q + 4.4222(d/h_q)^2 - 4.9825(d/h_q)^3,$$

式中:  $\gamma_{R h}$  为浅水对应的整流系数,  $\gamma_{R \infty}$  为深水对应的整流系数。

构造浅水船舶操纵运动数学模型需计算一系列含未知函数的微分方程,通常不易直接求解,可采用 Runge-Kutta 法计算。应用于实际工程时,为满足模拟精度,选择四阶 Runge-Kutta 法计算船舶操纵运动方程。

## 3 数值模拟及分析

### 3.1 工程概况

湘江是湖南对接长江经济带、助推湘江流域经济发展、健全综合交通运输系统的重要纽带。湘江衡阳蒸水河口至株洲枢纽 154 km II 级航道的整治工程为湘江 II 级航道二期工程的子任务,工程位置距株

洲枢纽库区 96 km,距大源渡枢纽库区 58 km,建设标准为水深 3 m、航宽 75 m,弯曲半径为 550 m,通航保证率为 98%。湘江株洲枢纽库尾整治河段平面图如图 1 所示。

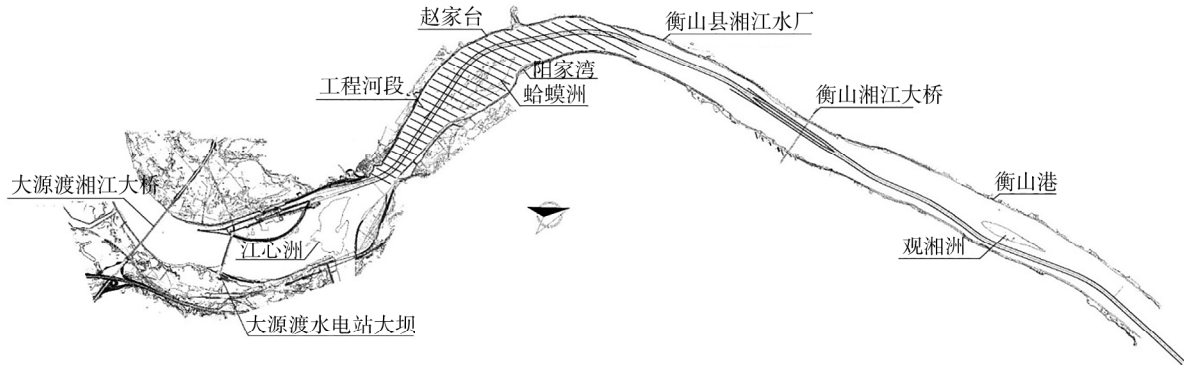


图1 湘江株洲枢纽库尾整治河段平面图

鱼弄子滩位于衡山县城上游约 6 km 处,大源渡枢纽下游,呈微弯型,右岸为大堤,左岸为凹岸,大部分为丘陵。中水河宽约 380~1 050 m。本河段上、下深槽较宽,中部深槽为平面形态,呈宽窄相间的莲藕状,床质多为砾石夹卵石,砾卵石层较密集,有一定抵抗冲刷的能力,年内和年际泥沙冲淤量变化较小。河道是连接船闸下游口门区的重要航段,但滩险散落,水流条件复杂,受上游水库调度及来水影响。

本滩出浅点位于蛤蟆洲,出浅长度约 2 550 m。成滩原因是浅滩段河床展宽,受采砂行为影响,河床起伏较大,水流分布不均,浅段流速较小,无力冲刷浅滩上的卵石河床质,导致滩槽散乱、水深、航宽不足而阻碍航行。

### 3.2 平面二维水流数学模型的验证

鱼弄子滩受浅水效应影响较大,水流条件复杂,选择水动力模型进行船舶数值模拟分析。

流量  $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$  时为枯水期,流量小、流速低,水深分布不均,船舶无法按指定路径通航,需整治航道以达到 II 级航道通航标准,如图 2 所示; $Q=6 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,闸门逐渐开敞泄水,回归天然行洪状态,此时流量、流速较大,但水位较低,处于渡汛区间。2 种流量下的水流条件明显不利于船舶通航,对其进行二维水流数值模拟。

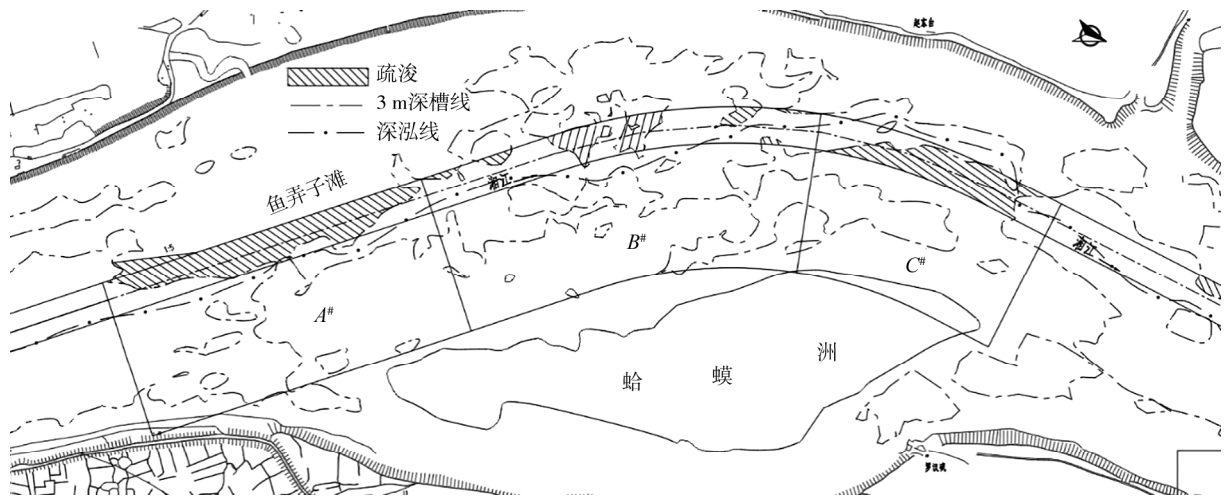


图2 流量  $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$  时鱼弄子滩航道整治平面布置图

计算水位和流速,比对工程河段实测水面线资料,验证水动力模型的可靠性。沿水流方向,采用声学多普勒流速剖面仪,从  $A^\#$  区域起始位置至  $C^\#$  区域结束位置布置 6 个实测断面,每个断面布置 5 个测点,实测点水位允许的系统误差和过失误差不超过  $\pm 0.03 \text{ m}$ ,满足数值计算规范要求<sup>[17]</sup>。经检验,河道糙率

变化范围为 0.025~0.030。

实测水位和平面二维水流数学模型计算水位如表 1 所示。由表 1 可知:河道糙率为区间时,数值计算取值偏大,模型计算结果偏小,误差均为负,但均未超过 0.040 m,平面二维水流数学模型计算水位与实测水位基本一致,说明平面二维水流数学模型合理。

表 1 不同流量下实测水位与二维水流数学模型计算水位及二者误差

测点	$Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的水位/m			$Q=6\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的水位/m		
	实测	二维水流数学模型计算	误差	实测	二维水流数学模型计算	误差
1#	39.500	39.471	-0.029	44.690	44.652	-0.038
2#	39.490	39.459	-0.031	44.650	44.615	-0.035
3#	39.470	39.441	-0.029	44.590	44.566	-0.024
4#	39.470	39.435	-0.035	44.570	44.541	-0.029
5#	39.440	39.426	-0.014	44.480	44.467	-0.013
6#	39.410	39.402	-0.008	44.270	44.257	-0.013

注:误差为二维水流数学模型计算水位与实测水位之差。

2 种流量下实测流速与数值模拟流速的结果对比如图 3 所示。由图 3 可知:实测流速与数值模拟流速基本一致,误差控制在合理范围内。

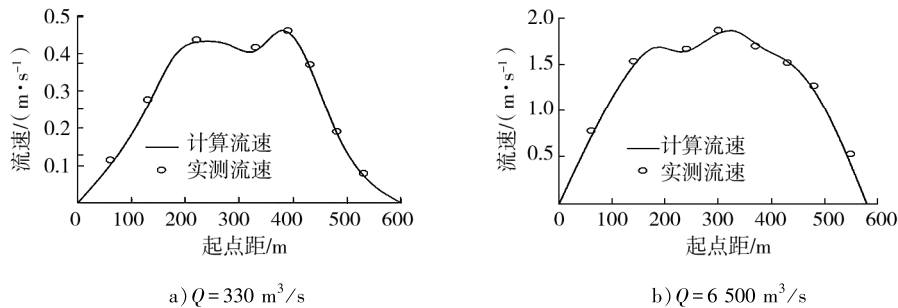


图 3 实测流速与数值模拟流速结果对比

### 3.3 浅水船舶操纵运动数学模型的验证及分析

#### 3.3.1 浅水船舶操纵运动数学模型的验证

参照文献[17],结合收集的实船资料,试验代表船型的基本参数如表 2 所示。

表 2 代表船型的基本参数

排水量/t	$B/\text{m}$	$C_b$	舵面积/ $\text{m}^2$	螺距/m	$L/\text{m}$	$d/\text{m}$	棱形系数	舵直径/m	螺旋桨个数
3 549	21.5	0.8	5.84	1.147	121.2	2.6	0.83	2.25	2

验证浅水船舶操纵运动数学模型在该航段的可行性,深水情况与浅水情况下实船与船舶数值模拟旋回运动的轨迹如图 4 所示。

由图 4 可知:数值模拟结果较真实地反映船舶在浅水中的操纵运动,计算所得船舶航行参数可评估该航段的整治效果,分析船舶航行的稳定性。

#### 3.3.2 通航条件及船舶稳定性分析

分析浅水效应对船舶航行的影响及整治前、后航道条件的改善,将疏浚浅滩段分为  $A^\#$ 、 $B^\#$ 、 $C^\#$  3 个滩段,如图 2 所示。 $A^\#$ 、 $C^\#$  段均为大面积疏浚区,受浅水效应影响较大, $B^\#$  为转弯段,水流条件复杂且存在疏浚情况,受水流作用影响较大。

通常船舶在通航条件较好的航道行驶时,舵角小于  $25^\circ$ ,漂角小于  $20^\circ$ ,上行船速大于  $0.4 \text{ m/s}$ <sup>[18]</sup>。整治航道前, $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$  时,规划航道水深不满足 II 级航道通航标准。

由图 2 所示深泓线分布位置可知:鱼弄子滩航道中部浅滩堆积,呈小山状分布,深槽散乱逐渐向凸岸过渡,再向凹岸延伸到下深槽,船舶通航的操纵难度较大; $Q=6\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,受浅滩影响,船舶上行受浅水效应引起的摩擦阻力作用,船舶经  $C^\#$  滩末端、 $A^\#$  滩末端和  $B^\#$  滩交接处按规划航道上行时,坡降阻力较大,船舶无法按规划航道上行,改向两侧漂移。

在保障船舶航行安全及航行稳定的情况下,确定不同工况船舶上行、下行的初始航速,进行船舶操纵运动数值模拟计算,结果如表 3 所示。

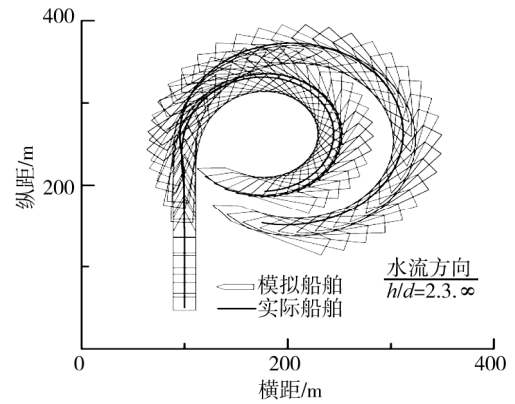


图 4 船舶回转性能验证( $\delta=25^\circ$ )

表 3 鱼弄子滩船舶操纵运动数值模拟计算结果

$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	工况	对岸航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	对水航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	漂角/ $(^\circ)$	舵角/ $(^\circ)$	通航时间/s		
						$A^\#$	$B^\#$	$C^\#$
330 <sup>①</sup>	深水上行	4.11~4.32	4.51~4.79	-4.11~1.30	-5~2	166	203	124
	浅水上行	1.51~1.83	2.06~2.30	-3.01~1.65	-5~5	334	481	290
	深水下行	4.86~5.13	4.38~4.79	-0.93~5.05	-3~3	135	173	102
	浅水下行	2.45~2.76	1.99~2.55	-1.93~4.23	-5~5	259	337	205
6 500 <sup>②</sup>	深水上行	2.67~3.33	4.29~4.83	-4.65~2.56	-5~5	182	269	214
	深水下行	4.82~6.98	3.01~4.62	-6.27~12.41	-8~10	108	135	88
	浅水下行	4.36~5.76	2.01~3.14	-7.99~18.99	-8~15	149	185	94
6 500 <sup>③</sup>	深水上行	2.67~3.31	4.46~5.96	-4.55~2.60	-5~5	176	263	211
	浅水上行	0.94~1.50	2.74~4.57	-3.08~1.16	-5~5	452	593	534
	深水下行	4.80~6.13	2.99~4.67	-6.89~9.84	-5~5	115	147	86
	浅水下行	4.09~4.80	2.73~3.18	-7.38~12.61	-8~10	152	213	118

注: $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$  时,航道整治前均不能通航; $Q=6\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,航道整治前不能浅水上行。

①整治后。②整治前。③整治后。

由表 3 可知:流量不变时,浅水域的船舶航速比深水域小,漂角和舵角的变化范围比深水域大,船舶的稳定性略降,通航时间比深水域长;整治航道后, $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$  时,航行参数均在合理范围内,且远小于规范控制值;整治航道前, $Q=6\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,可将航行参数控制在限制范围内,但散乱浅滩航行难度较大,切换舵角较频繁,允许船舶改向的富余空间有限,不能按常规指标判断,最大漂角临近规范限值,诸多工况下无法通航,船舶的通航条件亟需整治;整治航道后, $Q=6\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时,船舶航行的最大漂角由  $18.99^\circ$  降至  $12.61^\circ$ ,执行最大舵角由  $15^\circ$  降至  $10^\circ$ 。

统计通航时间,整治前、后船舶航行参数漂角、舵角的变化如图 5 所示。整治前水流条件不好,船舶的对岸航速变化较大,局部存在航速过大,船舶航行不利的现象,整治后,船舶航速较稳定,基本未超过  $5 \text{ m/s}$ 。由图 5 可知:整治航道前、后,船舶在  $A^\#$  区域航行的控制舵角变化较小,整治航道后,航行约  $180 \text{ s}$ ,船舶漂角明显下降,说明船舶的航行更稳定,安全性提高;在  $B^\#$  区域,整治航道前船舶航行时需较大舵角才能调整船舶航行方向,整治航道后,船舶调整舵角的幅度显著下降,在  $250 \sim 420 \text{ s}$ ,最大舵角由  $15^\circ$  减至  $10^\circ$ ,最大船舶航行漂角由  $18^\circ$  减至  $12^\circ$ ,说明船舶的航行更稳定,安全性提高;在  $C^\#$  区域,整治前船舶需多次调整舵角才能航行通过,整治后仅调整 2 次就可驶过  $C^\#$  区域,整治前的船舶航行舵角变幅为  $-5^\circ \sim 15^\circ$ ,漂角为  $-5^\circ \sim 18^\circ$ ,整治后航行舵角变幅为  $0^\circ \sim 5^\circ$ ,漂角为  $0^\circ \sim -10^\circ$ ,船舶的航行稳定性

较整治前更好。

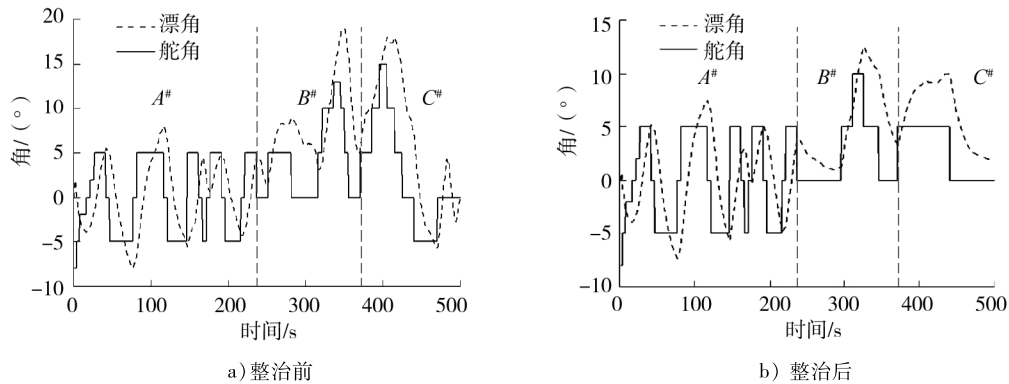


图5  $Q=6\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  时浅水下行的船舶航行参数历时曲线

采取航道整治措施后, $Q=330\ \text{m}^3/\text{s}$  时船舶能正常航行; $Q=6\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  时,船舶可浅水上行,整治散乱浅滩的航道有效改善了航道通航条件,提升了船舶航行稳定性。

## 4 结束语

结合平面二维水流数学模型及浅水船舶操纵运动数学模型,评估湘江Ⅱ级航道二期工程鱼弄子滩Ⅱ级航道的整治效果,分析通航条件和船舶航向稳定性。

1) 结合实测资料,对河床起伏较大、水流分散,水深、航宽不足的散乱浅滩弯曲航道的水流和船舶通航进行数值模拟,建立平面二维水流数学模型和浅水船舶操纵运动数学模型,根据模拟结果综合论证航道整治措施对水流条件的影响。

2) 浅滩河段流速较小,水流无力冲掉浅滩上的卵石河床质,滩槽散乱,妨碍通航。整治此类航道前无法进行实船试验,或实船试验风险、成本较高,可采取船舶操纵运动数学模型进行模拟计算及航行仿真,该方法经率定后可靠度较高,是研究船舶通航条件及船舶行驶稳定性较经济、安全的方法,研究结论可为航线规划及后续整治航道任务提供参考。整治后湘江Ⅱ级航道二期工程鱼弄子滩航道水深达到Ⅱ级航道运行要求。

本文基于3自由度船舶操纵数学模型,论证浅水效应作用下在散乱浅滩弯曲航道航行时的船舶航向情况。外界条件复杂,通航条件受限时,需采用更高自由度的船舶操纵数学模型进行分析。鱼弄子滩位于大源渡水电站下游2 km处,该滩段航道受水库调度和来水影响,需考虑河底冲刷和泥沙淤积问题。

### 参考文献:

- [1] 张秀凤, 王晓雪, 孟耀, 等. 船舶运动建模与仿真研究进展及未来发展趋势[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(1): 1-8.  
ZHANG Xiufeng, WANG Xiaoxue, MENG Yao, et al. Research progress and future development trend of ship motion modeling and simulation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(1): 1-8.
- [2] 杨晓. 水动力模型驱动下的智能船舶仿真平台研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.  
YANG Xiao. Research on simulation platform of intelligent ship driven by hydrodynamic model[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [3] 王建华, 万德成. 船舶操纵运动 CFD 数值模拟研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(5): 813-824.  
WANG Jianhua, WAN Decheng. CFD simulations of ship maneuvering motion [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(5): 813-824.
- [4] BUDAK G, BEJI S. Controlled course-keeping simulations of a ship under external disturbances[J]. Ocean Engineering, 2020, 218(1): 1-12.



- [5] 朱冬健. 船舶波浪中操纵横摇预报及航向跟踪控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.  
ZHU Dongjian. Study on ship maneuvering and rolling prediction and course-keeping control in waves [D]. Shanghai: Shanghai Jiong Tong University, 2015.
- [6] SANO M, YASUKAWA H, HATA H. Directional stability of a ship in close proximity to channel wall[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2014, 19(4):376-393.
- [7] NAZ N, KARIM M M. Investigation of hydrodynamic characteristics of high speed multihull vessels including shallow water effect[J]. Procedia Engineering, 2017, 194:51-58.
- [8] YASUKAWA H. Maneuvering hydrodynamic derivatives and course stability of a ship close to a bank [J]. Ocean Engineering, 2019, 188:106149.
- [9] 童思陈, 唐小娅, 张欢. 基于非均匀流浅水效应的船舶操纵建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3):866-872.  
TONG Sichen, TANG Xiaoya, ZHANG Huan. Modeling and simulation of ship maneuvering motion based on non-uniform flow and shallow water effect[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3):866-872.
- [10] 左利钦, 陆永军, 朱昊. 波流边界层水沙运动数值模拟:I:水动力模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(4):556-567.  
ZUO Liqin, LU Yongjun, ZHU Hao. Numerical simulation of flow-sediment dynamics in wave-current bottom boundary layer:I:flow dynamics modelling[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(4):556-567.
- [11] 魏可可, 高霄鹏. 风载荷作用下的操纵性研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(8):48-54.  
WEI Keke, GAO Xiaopeng. Research on maneuverability under wind load [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(8):48-54.
- [12] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型:机理建模与辨识建模[M]. 大连:大连海事大学出版社, 1999.
- [13] 张强, 张显库. 考虑螺旋桨倒车特性的船舶港内操纵数学模型及仿真应用[J]. 中国造船, 2016, 57(4):147-156.  
ZHANG Qiang, ZHANG Xianku. A ship maneuvering model and application in harbor considering reversing characteristics of propeller[J]. Building of China, 2016, 57(4):147-156.
- [14] 尤兴涛. VLCC受风作用下四自由度操纵性研究[D]. 大连:大连海事大学, 2015.  
YOU Xingtiao. The research of the four degrees of freedom maneuverability of VLCC under the effect of wind [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [15] 杨景, 任俊生, 张钊, 等. 导管调距桨全回转拖轮停船运动建模与仿真[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(2):13-19.  
YANG Jing, REN Junsheng, ZHANG Zhao, et al. Modelling and simulation on stopping motion of azimuth stern drive tug with ducted controllable pitch propellers[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43(2):13-19.
- [16] 翁伯林. 浅海中运动船舶的数值模型[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(18):67-69.  
WENG Bolin. The numerical model of moving ship in shallow sea [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(18):67-69.
- [17] 全国内河船标准化技术委员会(SAC/TC 130). 长江运输船舶操纵性衡准:JTT 258—2021[S]. 北京:人民交通出版社, 2021.
- [18] 田红伟, 官志鑫, 易振宇, 等. 湘江大花滩航道整治方案优化及效果数值研究[J]. 水运工程, 2021, 588(11):127-131.  
TIAN Hongwei, GUAN Zhixin, YI Zhenyu, et al. Numerical study of waterway regulation optimization and effect of Dahuatan shoal in the Xiangjiang River[J]. Port&Waterway Engineering, 2021, 588(11):127-131.

## Ship maneuvering simulation for the river section in the tail of the Xiangjiang Zhuzhou Hub Reservoir

SHU Xiaohong<sup>1</sup>, ZOU Kaiming<sup>2</sup>, WANG Yinghong<sup>3</sup>

1. Hunan Provincial Communication Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410008, China;

2. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410008, China;

3. Hunan Xiangshui Group Co., Ltd., Changsha 410008, China

**Abstract:** In order to solve the problem of complex water flow conditions in scattered and shallow shoals, curved

river sections, difficult ship navigation, and susceptibility to shallow water effects, a two-dimensional mathematical model of water flow and a mathematical model of ship maneuvering motion are established. Taking the Yunongzi Shoal at the tail of the Zhuzhou Hub on the Xiangjiang River as an example, the reliability of the mathematical model is verified through field measurement data. The numerical simulation of ship motion under typical working conditions is conducted to calculate the corresponding navigation parameters and evaluate the effect of channel improvement and navigation conditions. The results show that dredging curved channels affected by scattered and shallow shoals can effectively optimize the water flow pattern, and significantly improve ship navigation conditions. The numerical simulation can provide scientific basis and guidance for evaluating the regulation effect of the crooked channel in scattered shoals.

**Keywords:** ship maneuvering mathematical model; shallow water effect; scattered and shallow shoal; curved channel

(责任编辑:王惠)

.....  
(上接第 126 页)

behind the continued development of cracks even after the application of sealing and bottom slab reinforcement using carbon fiber sheets. A section-layered model of the box girder bridge is established to represent the physical and mechanical behaviors of the top slab, web, and bottom slab. The differential concrete shrinkage and creep between the web and the top/bottom slabs is taken into account which due to variations in theoretical thickness and reinforcement ratio. A calculation method is derived to estimate the self-induced stresses in the cross-section of the box girder bridge caused by non-uniform shrinkage and creep. The effectiveness of this method is validated by applying it to an actual bridge, which shows that the maximum tensile stress occurs in the mid-section of the web, and it attenuates along the top and bottom slabs, which is consistent with the observed crack pattern of the real bridge. The calculated timing of crack initiation aligns well with the actual occurrence of cracks in the bridge. The research demonstrates that non-uniform shrinkage and creep is important contributing factors to vertical cracking in the web of box girder bridges.

**Keywords:** bridge engineering; non-uniform shrinkage and creep; stratified cross-section; vertical cracks of web; tensile stress

(责任编辑:王惠)